

文章编号: 1674—8247(2024)05—0053—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.009

# 基于决策树模型的轨道服役状态预警研究

黄 晖 张 斌

(1. 中铁二十四局集团南昌铁路工程有限公司, 南昌 330002;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013)

**摘 要:**随着高速铁路服役时间的增加,各类轨道病害不断发生,尤其是高温天气引起无砟轨道结构服役状态持续劣化,出现严重结构伤损问题。以工程应用为导向,建立可靠的轨道结构服役状态预警模型,提出判别服役状态的预警方法,是实现铁路运输安全生产的重要保障措施之一。本文通过在某线路搭建服役环境和轨道板温度在线监测系统,将温度梯度出现概率等于0.3%时的取值作为轨道板温度梯度预警限值,基于人工智能算法决策树模型进行轨道结构服役状态预警研究。研究表明:(1)采用决策树模型可以有效预测轨道结构服役状态,实现轨道板温度梯度的质量等级划分;(2)轨道服役状态预警结果准确性与样本数量密切相关,丰富监测样本数据库,将会更全面精准地预测轨道结构异常状态,以便保障轨道养护维修的及时性。

**关键词:**高速铁路;服役状态;决策树;温度梯度;预警模型

中图分类号:U216.3

文献标志码:A

## Study on Early Warning of Track Service Conditions Based on Decision Tree Model

HUANG Hui ZHANG Bin

(1. Nanchang Railway Engineering Co., Ltd. of China Railway Twenty-fourth Bureau Group Co., Ltd., Nanchang 330002, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** With the increasing service time of high-speed railways, various track defects continuously emerge, particularly severe structural damage caused by elevated temperatures, which would affect the service conditions of ballastless track. Establishing a reliable early warning model for track service conditions and developing a method for identifying such conditions are among the essential measures for ensuring the operation safety of railway transport. For the purpose of this study, an online monitoring system was set up along a railway for on-line monitoring of the track environment and slab temperature, and the value at the probability of 0.3% for temperature gradient occurrence was taken as the threshold for slab temperature gradient warnings. Then an AI algorithm decision tree was employed to construct the early warning model for track structure service conditions. The findings indicate that: (1) The decision tree model can effectively predict track structure service conditions, enabling the determination of slab temperature gradient quality levels. (2) The accuracy of early warning for track service conditions is strongly correlated with the quantity of samples in the database, and enhancing the richness of monitoring sample database will enable a more comprehensive and precise prediction of abnormal track structure conditions, ensuring timely track maintenance and repair.

收稿日期:2023-05-08

作者简介:黄晖(1985-),男,工程师。

基金项目:国家自然科学基金项目(52468062);江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51009);中国铁路广州局集团有限公司科研项目(2021K093-Z)

引文格式:黄晖,张斌.基于决策树模型的轨道服役状态预警研究[J].高速铁路技术,2024,15(5):53-58.

HUANG Hui, ZHANG Bin. Study on Early Warning of Track Service Conditions Based on Decision Tree Model[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):53-58.

**Key words:** high-speed railway; service conditions; decision tree; temperature gradient; early warning model

轨道结构是列车行车的基础,铁路运营安全与轨道结构存在密切关系,轨道服役状态的有效预警对铁路工务部门养护维修工作具有重要价值。目前,我国铺设了世界上里程最长的高速铁路,特别是在东部沿海地区,高速铁路已经形成网络并且逐渐加密。高速铁路列车发车间隔不断压缩,对铁路线路运维提出了重大挑战<sup>[1]</sup>。因此,结合运营线路养修状况,实现轨道结构状态有效预警是铁路线路预防性维修的必经之路<sup>[2-3]</sup>。近年来,华东地区屡次出现夏季极端高温天气引起纵连式无砟轨道出现不同程度的轨道板上拱变形、宽窄接缝破损等病害<sup>[4-5]</sup>。因此,如何有效地结合气象环境,实现纵连式无砟轨道状态预警具有重要的实践意义。

针对环境作用下无砟轨道状态预警问题,国内外开展了较多研究。在温度场变形机理方面<sup>[6-9]</sup>,主要分为由气象资料求解热传导方程得出轨道板结构温度场和利用统计学分析方法建立板式无砟轨道温度预测模型。在模型试验方面<sup>[10-12]</sup>,通过模拟相应的轨道服役环境,利用等尺寸或缩尺轨道结构模型,研究影响无砟轨道状态的关键性因素。在轨道在线监测方面<sup>[13-15]</sup>,搭建轨道在线监测系统,根据监测数据对轨道实际服役性能变化规律进行分析。上述研究极大地推动了对于无砟轨道结构服役状态的认识,对轨道结构设计、病害预防以及养护维修等方面都起到了方向性指导作用。然而,模型试验难于反映实际状态、现场测试破坏轨道整体性能等诸多局限性困难仍然存在,环境作用下无砟轨道服役状态预警这一科学问题存在较大的研究空间。

本文从无砟轨道服役环境因素入手,通过选择合理的无砟轨道预警参数,构建基于决策树模型的轨道服役状态预警算法,以期探索实现无砟轨道服役状态有效预警的途径。

1 样本来源

本文分析数据来源于华东地区某 350 km/h 纵连式无砟轨道线路,轨道板内埋设温度传感器,道旁安装环境监测气象站,采集轨道板层间温度、环境温度和湿度以及太阳辐射等气象参数数据。另外,为了减小环境对于采集数据的影响,保证数据有效性,气象站四周应当通风良好,周边无高大树木遮挡。

现场监测设备采样频率为 30 min/次,可以有效地获取环境温度值、湿度值、太阳辐射值及风速值和轨道板温度值等。依据 TB 10621 - 2014《高速铁路

设计规范》中温度荷载及混凝土收缩影响规定,正温度梯度 90 ℃/m 为设计建议值,超过此限值时,轨道板极易发生翘曲变形等结构问题。然而,由于正温度梯度超过 90 ℃/m 属于极端情况,极少出现,故若将此设计建议值作为预警值并无实际意义。因此,本文基于极小概率事件统计学理论,将温度梯度出现概率等于 0.3% 时的值作为轨道板温度梯度预警限值,基于人工智能算法决策树模型对轨道结构服役状态进行预警研究。

2 决策树算法

2.1 决策树算法概述

通过现场实测的环境数据和轨道板温度,研究轨道板在自身结构以及环境因素综合作用下的变形特征,建立无砟轨道服役状态预警模型,对预测结果进行分析,判断轨道结构的服役状态,并实现轨道板病害、损伤等问题的及时预警。

气象环境因素具有明显的不确定性,轨道结构温度梯度与太阳辐射等气象参数之间存在较强相关性。因此,预警模型需要具有较为显著的泛化能力。本文选择决策树模型及算法,采用自顶向下的顺序,自初始值开始,通过与决策树节点属性值进行比较,确定相应的路径分支。也即,决策树模型是从根节点开始到叶节点结束,所选择的路径有一系列的决策逻辑。决策树生成如图 1 所示。

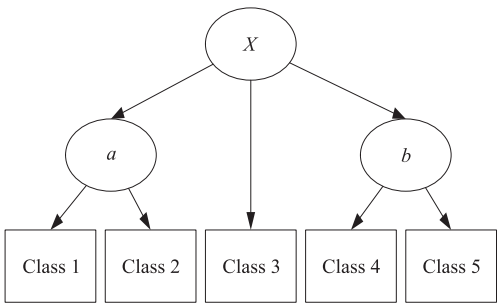


图 1 决策树生成图

决策树中的每个节点,测试函数只能使用一个属性进行测试。决策树自顶向下,从根节点 X 开始,分别对比决策树节点 a、b 的属性值,以属性值的不同为依据,选择不同的节点分支,直到叶节点 Class 1、Class 2 …… 结束,路径上的节点即决策树相应的决策规则。

决策树的建立离不开具有耦合性的训练样本,为解决过拟合问题,有必要修剪决策树多余枝干并找到平衡点。具体决策程序如下:

(1)属性选择度量

划分属性是首要任务,合适的属性选择度量可以提高决策树节点的“纯度”。决策树算法常用的属性度量为信息增益、信息增益率以及 GINI 指数,具体如表 1 所示。

表 1 决策树算法常用属性度量表

属性选择度量	缺点	算法
信息增益	通常选择拥有较多值的属性	ID3
信息增益率	通常选择拥有较少值的特征	C4.5
GINI指数	一般适用于对特征进行二划分	CART

(2)构建决策树

在训练数据集中,筛选出属性类别已知的数据集,计算得出其属性度量,并根据其属性度量,将训练数据集划分为单个类,以此绘制树状图,同时在各决策分支上注明划分依据。

(3)选择修剪方法

一般可分为预剪枝与后剪枝。预剪枝方法是先计算决策树每个节点的期望值,若某节点处期望值较小,则不再进行下一步划分,将此节点作为叶节点;后剪枝方法是先建立决策树模型,自下而上评估决策树每个节点对决策树泛化能力的提高作用,若无提高效率,则将该节点进行剪枝。

2.2 决策树模型的构建

将气象环境监测参量和轨道板温度测试参量形成一个样本训练集  $C$ ,其中环境因素包含太阳辐射、环境温度、湿度、风速和风向等 5 类样本,则训练集可以记为  $\{C^1, C^2, \dots, C^6\}$ ,其中:  $C^1 \sim C^5$  是环境因素,  $C^6$  是轨道板温度梯度样本。假设训练中第  $i$  类样本比例为  $m_i$ ,则样本集合的信息熵为:

$$E(C) = - \sum_{i=1}^5 m_i \log_2 m_i \tag{1}$$

式中:  $E(C)$ ——样本集合的信息熵;

$C$ ——样本集合;

$m_i$ ——训练集中第  $i$  类样本所占比例。

一般情况下,信息熵的值越小,表示训练集  $C$  纯度越高。根据相应属性值对训练样本进行划分,计算环境参数的信息熵为:

$$E_x(C) = \sum_{v=1}^5 \frac{|C^v|}{|C|} E(C) \tag{2}$$

式中:  $E_x(C)$ ——5 个环境参数的信息熵;

$v$ ——第  $v$  类环境参数。

信息增益是原始信息需求与新信息需求之间的差异,可表示为:

$$G(C,a) = E(C) - E_x(C) \tag{3}$$

式中:  $G(C,a)$ ——信息增益,原始信息需求与新信息

需求之间的差异;

$a$ ——决策树内部节点属性。

对信息增益进行标准化处理,本文所使用的 C4.5 算法中,标准化方法常采用信息增益率表示:

$$G_r(C,a) = G(C,a)/I(a) \tag{4}$$

其中:

$$I(a) = - \sum_{v=1}^5 \frac{|C^v|}{|C|} \log_2 \frac{|C^v|}{|C|} \tag{5}$$

式中:  $G_r(C,a)$ ——信息增益率,信息增益与固有值之比;

$I(a)$ ——属性  $a$  的固有值。

考虑到环境因素参数是连续型样本,不能直接根据离散属性进行节点划分。因此,可以采用二分法对连续属性进行处理,具体算法流程如图 2 所示。

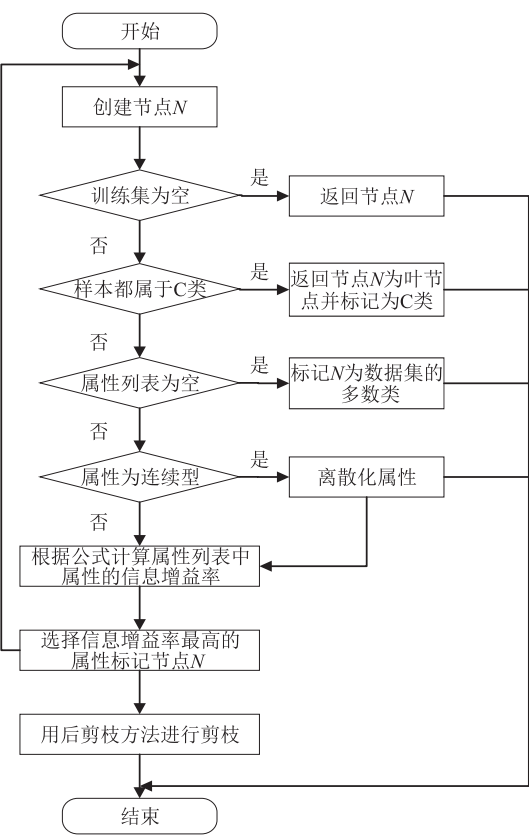


图 2 决策树算法流程图

3 案例分析

本文案例中监测的无砟轨道,夏季长期处于高温条件下,其轨道板内热量分布不均匀,板内层间产生温度梯度作用,导致轨道板易发生上拱,引起离缝等病害。选取 6 月 1 日—10 月 22 日监测数据作为样本,共计 6 912 组样本,按照 20% 和 80% 样本比例分别放置于测试集和训练集,建立决策树预测模型,按照算法流程进行轨道结构服役状态预警仿真。

对数据样本统计分析,将轨道结构服役状态划分为两类,轨道板温度梯度在  $-31.5 \sim 66.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$  区间划分为质量等级 I 类,不在此区间的划分为质量等级 II 类(也称为“预警区间”)。数据样本分布情况如表 2 所示。

表 2 数据样本分布表(个)

子集类别	样本总数	样本数量	
		I	II
训练集	5 530	5 480	50
测试集	1 382	1 372	10

建立决策树预测模型时,以环境温度为根节点进行划分。选取环境温度  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  为划分值,即当环境温度超过  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,选取决策树右半树规则,当环境温度未超过  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,选取决策树左半树规则,以此划分依据逐步推导至叶节点,得到 26 条决策树规则,如图 3 所示。

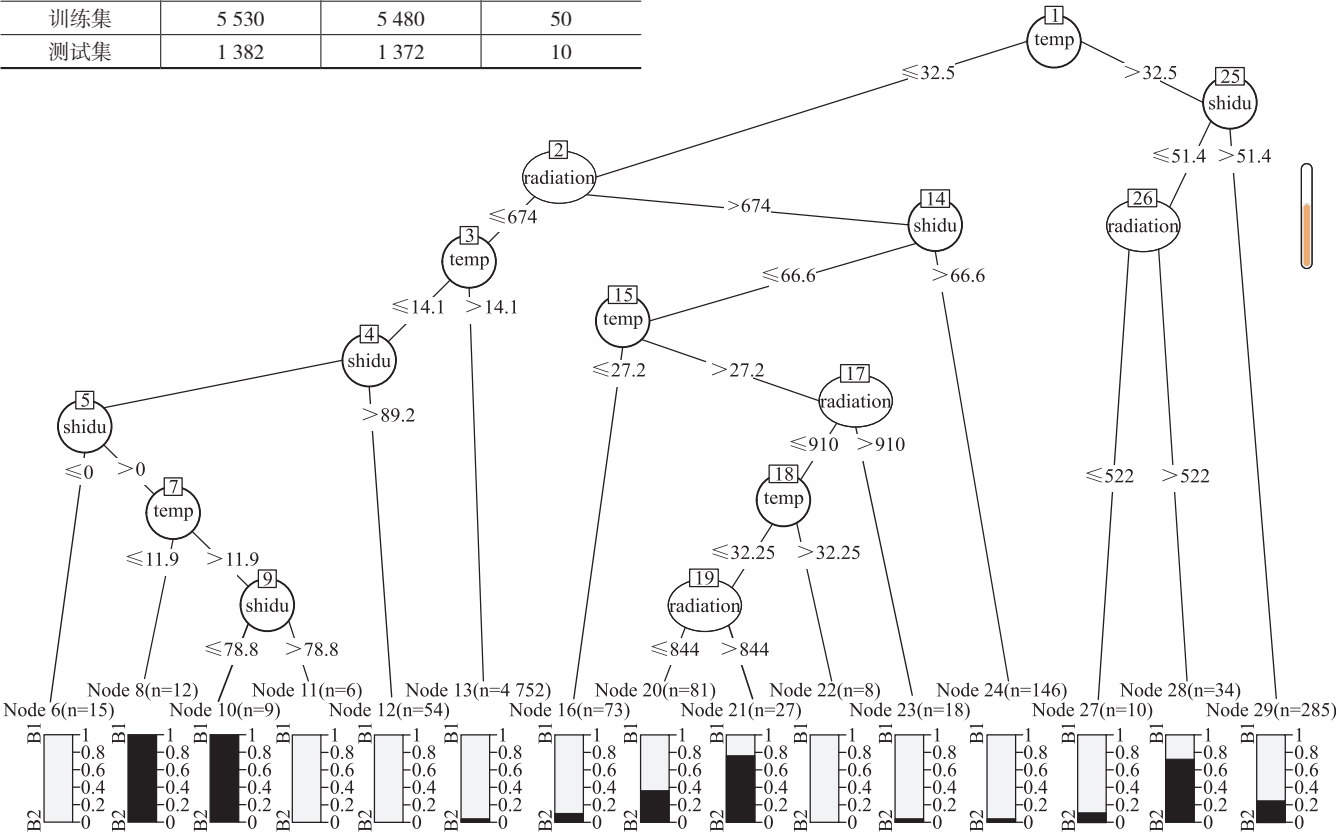


图 3 决策树规则模型图

按照上述规则建立决策树模型后,对比分析 5 个气象参数的重要性,如图 4 所示。由图 4 可知,太阳辐射、环境温度及湿度等特征参数对轨道板温度梯度的影响比例均为 100%,风速的影响比例为 95%,风向

向的影响比例仅为 10%。由此可知,太阳辐射、环境温度及湿度等特征参数的影响较为显著,而风向的影响较为微弱。因此,轨道板温度梯度产生异常的主要原因来自太阳辐射、气温和湿度等影响因素。

利用训练集,根据 C4.5 算法建立决策树模型,将训练集的参数样本代入决策树模型中进行训练,对轨道板温度梯度质量等级进行预测,结果如表 3 所示。在 5 530 组训练集样本中,与实际结果不符的样本有 382 组,模型预测准确率约为 93.1%。

表 3 训练集预测结果表

预警类别	正确样本数量/个	错误样本数量/个	准确率/%
I	5 111	369	93.3
II	37	13	74.0
总数	5 148	382	93.1

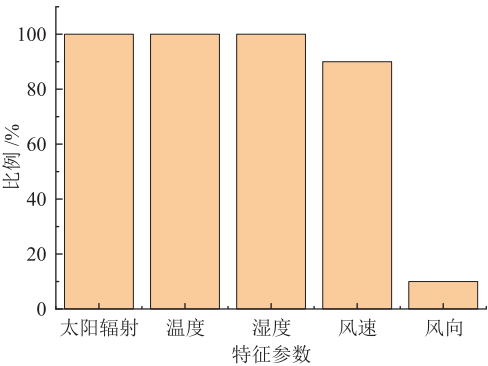


图 4 特征重要性对比图

利用测试集验证模型的辨识度。将测试集的



1 382 个参数样本代入决策树模型中进行轨道板温度梯度质量等级预测,对比监测数据判断预测正确样本的数量,结果如表 4 所示。在 1 382 组测试集样本中,与实际结果不符的样本有 95 组,模型预测准确率约为 93.1%。由预测结果可以看出,决策树模型预测准确率较高,该模型辨识度较强,具备较好的泛化能力。

表 4 测试集预测结果表

预警类别	正确样本数量/个	错误样本数量/个	准确率/%
I	1 280	92	93.3
II	7	3	70.0
总数	1 287	95	93.1

由表 3、表 4 可知,对于质量等级为 II 类的轨道结构服役状态,模型预测准确率明显低于 I 类,其原因是质量等级为 II 类所对应的温度梯度数据在样本库中数量较少。在实际服役状态下,超限预警情况较少,导致模型训练过程中对应 I 类轨道服役状态的数据划分更加偏重,而对于 II 类轨道服役状态则训练数据过少,造成 II 类轨道结构服役状态的预测准确率远低于 I 类。

本文所建立的温度梯度预警模型,主要目的是及时、准确地预测轨道结构服役状态异常情况,便于铁路轨道工作人员预判异常情况的出现以及发生异常情况时可以及时实施对应的养护维修。因此,为提高质量等级为 II 类的轨道结构服役状态预测准确率,在建立决策树预警模型过程中,提出统计各类错误相对应成本的方法,即建立成本矩阵。通过成本矩阵设置数值试验,认为将 II 类轨道结构服役状态预测错误成本设置为 I 类轨道服役状态预测错误成本的 4 倍时模型优化效果较好,如表 5、表 6 所示。

表 5 训练集预测结果表

预警类别	正确样本数量/个	错误样本数量/个	准确率/%
I	4 978	502	90.8
II	45	5	90.0
总数	5 023	507	90.8

表 6 测试集预测结果表

预警类别	正确样本数量/个	错误样本数量/个	准确率/%
I	1 234	129	90.5
II	9	1	90.0
总数	1 243	130	90.5

由训练集和测试集预测结果可知,优化后模型对于样本总体的预测准确率有所降低,降低幅度并不大,仍保持在 90%左右;但是,对于 II 类轨道结构服役状态的预测准确率从 70%提高到 90%左右,说明模型更好地实现了对轨道结构服役状态异常情况的有

效预警。

4 结论

本文从高速铁路轨道服役状态的现场实际出发,通过在无砟轨道旁安装气象站和监测装置来获取环境因素和轨道板温度等信息,将温度梯度出现概率等于 0.3%时的取值作为轨道板温度梯度预警限值,采用人工智能算法决策树模型进行仿真预测,得到主要结论如下:

- (1) 基于气象参数和无砟轨道监测数据建立决策树预警模型,利用测试数据对预警模型进行验证。此模型可以对轨道板温度梯度是否超过阈值进行有效预测,实现轨道板温度梯度的质量等级划分。
- (2) 无砟轨道服役状态预警结果准确率依赖于样本数量,扩充监测样本数据库,可以更好地掌握轨道结构服役状态。
- (3) 决策树模型中,设置成本矩阵是提高预测准确率的有效手段,下一阶段将重点开展最小成本路径算法等方面研究。

参考文献:

[1] 张加奇. 高速铁路道岔可动心轨辙叉拆分修技术研究及应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 39-44.  
ZHANG Jiaqi. Research and Application of Disassembly and Repair Technology for Movable Point Frog of High-speed Railway Turnout[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 39-44.

[2] 李兆洋, 刘红娇, 李毅, 等. 基于图像处理的高速铁路轨道巡检系统[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 21-26.  
LI Zhaoyang, LIU Hongjiao, LI Yi, et al. A High-speed Railway Track Inspection System Based on Image Processing[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 21-26.

[3] 殷明旻, 向芬, 乔建春, 等. 路基段双块式无砟轨道在线重构整治研究与实践[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 102-106.  
YIN Mingmin, XIANG Fen, QIAO Jianchun, et al. Research and Practice of On-line Reconstruction of Bi-block Ballastless Track in Subgrade Section[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 102-106.

[4] 谭社会. 高温条件下 CRTS II 型板式无砟轨道变形整治措施研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 23-27.  
TAN Shehui. Study on Deformation Treatment Measures for CRTS II Slab-type Ballastless Track in High Temperature Condition[J]. Railway Engineering, 2016, 56(5): 23-27.

[5] 徐桂弘, 杨斌, 李耀东, 等. 双块式无砟轨道轨枕裂纹内动水压力特性研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2017, 34(6): 115-120.  
XU Guihong, YANG Bin, LI Yaodong, et al. Research on Crack Dynamic Water Pressure Characteristics of Twin-block Track Sleeper

[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2017, 34(6): 115 – 120.

[6] 刘学毅, 李佳莉, 康维新, 等. 无砟轨道温度简便计算及极端天气影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1037 – 1045, 1060.

LIU Xueyi, LI Jiali, KANG Weixin, et al. Simplified Calculation of Temperature in Concrete Slabs of Ballastless Track and Influence of Extreme Weather [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1037 – 1045, 1060.

[7] 刘付山, 曾志平, 吴斌, 等. 高速铁路连续式无砟轨道温度场分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 86 – 93.

LIU Fushan, ZENG Zhiping, WU Bin, et al. Study on Temperature Field of Continuous Ballastless Track for High-speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12): 86 – 93.

[8] 欧祖敏, 孙璐, 程群群. 高速铁路无砟轨道温度场简化计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 482 – 487.

OU Zumin, SUN Lu, CHENG Qunqun. Simplified Calculation of Temperature Field in High-speed Railway Ballastless Track Structure [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(3): 482 – 487.

[9] 苏成光. 路桥过渡段无砟轨道长期温度梯度试验研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(2): 56 – 61.

SU Chengguang. Long-term Temperature Gradient Test of Ballastless Track on Bridge-subgrade Transition Section [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(2): 56 – 61.

[10] 李健, 赵坪锐, 万章博, 等. 双块式无砟轨道温度场试验研究和数值分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 729 – 735.

LI Jian, ZHAO Pingrui, WAN Zhangbo, et al. Experimental Research and Numerical Analysis of Temperature Field on Bi-block Ballastless Track [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 729 – 735.

[11] 尤明熙, 高亮, 赵国堂, 等. 板式无砟轨道温度场和温度梯度监测试验分析[J]. 铁道建筑, 2016(5): 1 – 5, 9.

YOU Mingxi, GAO Liang, ZHAO Guotang, et al. Analysis of Monitoring Test for Slab-type Ballastless Track Temperature Field and Temperature Gradient [J]. Railway Engineering, 2016(5): 1 – 5, 9.

[12] 闫斌, 刘施, 戴公连, 等. 我国典型地区无砟轨道非线性温度梯度及温度荷载模式[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 81 – 86.

YAN Bin, LIU Shi, DAI Gonglian, et al. Nonlinear Temperature Gradient and Temperature Load Mode of Ballastless Track in Typical Areas of China [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 81 – 86.

[13] 张鹏飞, 雷晓燕, 高亮, 等. 高速铁路桥上无缝线路静态监测数据分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 40 – 44, 62.

ZHANG Pengfei, LEI Xiaoyan, GAO Liang, et al. Analysis of the Static Monitoring Data for CWR on High-speed Railway Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 40 – 44, 62.

[14] 王玉泽, 王森荣. 高速铁路无砟轨道监测技术[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 1 – 9.

WANG Yuze, WANG Senrong. Monitoring Technique for Ballastless Track of High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 1 – 9.

[15] 郭云祺, 李再帏, 何越磊, 等. 基于支持向量机的CRTS II型板式无砟轨道板正温度梯度预警方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2209 – 2216.

GUO Yunqi, LI Zaiwei, HE Yuelei, et al. A Novel Method of Forewarning the Positive Temperature Gradient of CRTS II Ballastless Track Based on Support Vector Machine [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2209 – 2216.